



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **HUIPPUNOPEAT JUNAT**

Miro Lapinoja

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2017

# TIIVISTELMÄ

Huippunopeat junat

Miro Lapinoja

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2017, 28 s.

Työn ohjaaja: Tapio Korpela

Työn tarkoituksena oli tehdä kirjallisuuskatsaus huippunopeista junista yleisellä tasolla. Laajan kokonaisuuden takia aihetta on rajattu lähinnä infrastruktuurin ja onnettomuuksien näkökulmasta tarkasteluun. Lisäksi kaikkiin aihealueisiin ei ole paneuduttu valtavan syväluotaavasti. Lukijalla on tarkoitus lukemisen jälkeen olla kohtuullisen kattava ja yleispätevä kuva siitä, mitä ovat huippunopeat junat.

*Asiasanat: huippunopea juna, onnettomuus, infrastruktuuri*

# ALKUSANAT

Työn tarkoitus on toimia opinnäytetyönä alemmassa korkeakoulututkinnossa. Tämän työn valmistuminen on ollut paljolti riippuvainen kirjoittajan motivaatiosta, eikä se olisi ollut mahdollista ilman lähimmäisten lempeää ohjausta. Tahdon kiittää rakasta puolisoani valtavasta jokapäiväisestä tuesta ja työn tärkeyden muistuttamisesta, ilman häntä tämä työ olisi vieläkin keskeneräisten kirjoitelmien seassa arkistojen kätköissä. Tahdon kiittää myös ohjaajaani avusta laajan aihealueen rajauksessa.

Oulu, 7.2.2017

Miro Lapinoja

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	5
2 YLEISESTI .....	6
3 INFRASTRUKTUURI .....	7
3.1 Eurooppa .....	7
3.2 Aasia.....	9
3.3 Amerikka.....	11
4 MAGLEV -TEKNIikka .....	13
4.1 Levitaatio.....	15
4.2 Propulsio .....	16
4.3 Ohjaus .....	17
5 KEHITYSKOhteET .....	18
5.1 Rata ja maaperä .....	18
5.2 Aerodynamiikka .....	20
6 TURVALLISUUS .....	22
6.1 Eschede -onnettomuus .....	22
6.2 Wenzhou -onnettomuus .....	24
6.3 Santiago -onnettomuus.....	25
6.4 Eckwersheim -onnettomuus .....	26
7 YHTEENVETO .....	27
8 LÄHDELUETTELO.....	28

## 1 JOHDANTO

Työn aiheena on kirjallisuuskatsaus huippunopeista junista. Aihe on valittu kirjoittajan mielenkiinnosta ja ohjaajan kanssa käytyjen keskustelujen perusteella mahdollisista aiheista. Työn tavoitteena on antaa lukijalle yleiskatsaus huippunopeista junista, sekä niiden turvallisuudesta. Työssä myös pohditaan huippunopeiden junien käytettävyyttä erilaisissa ympäristöissä ja kuljetusmuotojen kilpailua. Aiheen laajuudesta johtuen aihetta on täytynyt rajata. Aiheen käsittelyssä pääpaino on infrastruktuurissa, kehityskohteissa ja turvallisuudessa. Nämä aihealueet ovat tärkeitä huomion kohteita huippunopeiden junien tulevaisuutta ajatellen. Tavoitteena ei ole suorittaa uutta tutkimusta vaan koota yleiskatsaus huippunopeista junista lukijan saataville yhteen paikkaan.

## 2 YLEISESTI

Huippunopean junan määritelmä ei ole yksiselitteinen. Pohjimmillaan määritelmä vastaa kysymykseen, missä nopeudessa tai olosuhteissa juna lasketaan huippunopeaksi. Euroopan Unionin direktiivi 96/48/EC, liite 1 määrittää huippunopeat junat yhdistelmäksi infrastruktuuria, vähimmäisnopeutta ja olosuhteita. Infrastruktuurin edellytyksenä on, että uusi rata on rakennettu, tai jo olemassa oleva rata on parannettu nimenomaisesti huippunopeita junia varten. Junan täytyy kulkea yli 250 km/h (kilometriä tunnissa) sille erityisesti rakennetulla radalla, tai yli 200 km/h sille päivitetyllä radalla, jotta se lasketaan huippunopeaksi. Olosuhteet tarkoittavat, että paikoitellen, olosuhteiden vaatiessa, alhaisemmillaakin nopeuksilla kulkevia junia voidaan laskea huippunopeiksi. Esimerkiksi maan pinnanmuodot, korkeuserot ja kaupunkisuunnittelun asettamat rajat ovat tällaisia olosuhteiden asettamia rajoja, sillä ne vaikuttavat suuresti suurten nopeuksien turvallisuuteen. (Wikipedia 2017)

Avainkäsite määritelmissä on aina turvallisuus. Kun uusia ratoja suunnitellaan tai vanhoja parannetaan, täytyy ne suunnitella siten, että juna voi aina kulkea siinä mahdollisimman turvallisesti. Samalla myös itse juna täytyy suunnitella mahdollisimman turvallisesti. Monet tavalliset junat voivat nykyään saavuttaa yli 200 km/h nopeuden kaupallisessa käytössä, mutta niitä ei lasketa huippunopeaksi, koska niitä junia tai niiden ratoja ei ole suunniteltu tai päivitetty huippunopeaa liikennettä varten. (Wikipedia 2017)

### 3 INFRASTRUKTUURI

Huippunopeilla junilla on selkeästi kolme keskittymää: Eurooppa, Aasia ja Pohjois-Amerikka. Laajin rataverkosto ja suurimmat nopeudet on saavutettu Aasiassa, pääasiassa Kiinassa ja Japanissa. Aasiassa ja Euroopassa on huippunopeille junille otollinen asukastiheys. Suuret asukaskeskittymät ovat sopivalla etäisyydellä toisistaan, jolloin matka-aika ei ole niin suuri, että se suosisi lentoliikennettä.

Yhdysvaltojen rataverkosto on rakennettu silloin, kun junaliikenne on ollut nopein liikkumismuoto. Myöhemmin lentämisen yleistyttyä Yhdysvaltojen pitkien matkojen taittaminen lentäen tuli huomattavasti kannattavammaksi sekä rahallisesti että ajallisesti. Tämä on laskenut junaliikenteen matkustajamääriä ja junaliikenteen kehittymistä yleensäkin.

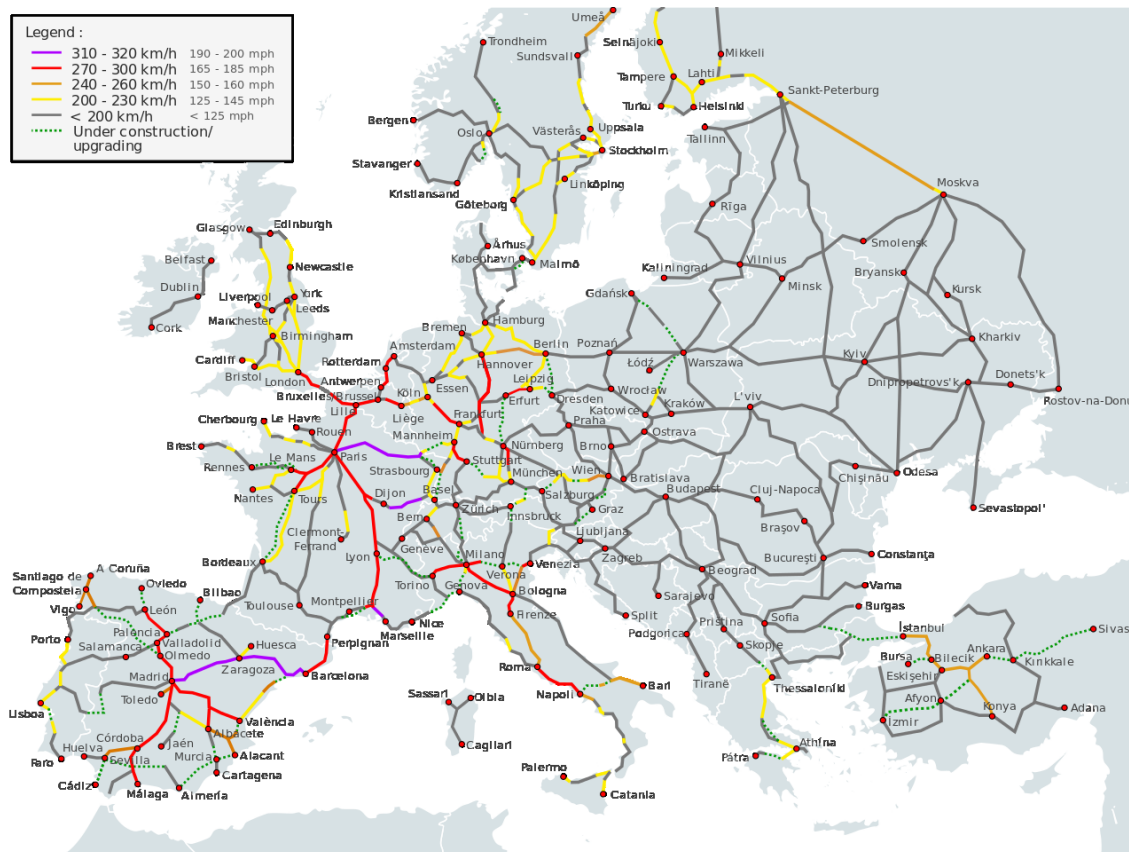
#### 3.1 Eurooppa

Euroopan suurimmat rataverkostot löytyvät Espanjasta ja Ranskasta. Italialla ja Saksalla on melko kattavat huippunopeat rataverkostot sekä yksittäisiä huippunopeita linjoja on myös Norjalla, Sveitsillä, Iso-Britannialla ja Turkilla. Kuvassa 1 on esitetty kartta Euroopan huippunopeista radoista. (Wikipedia 2017)

Espanjalla huippunopeiden junien rataverkoston pituus on jopa 3100 km, joka on Euroopan suurin ja koko maailman toiseksi suurin, häviten vain Kiinan yli 20000 km rataverkolle. Espanjalla on useita perinteisen ratojen päivitysprojekteja ja useita uusien ratojen rakennusprojekteja menossa. Jos suunnitteilla olevat radat valmistuvat ajallaan, vuoteen 2020 mennessä kaikki Espanjan maaseutukeskukset ovat alle kolmen tunnin matkan päässä Madridista ja alle kuuden tunnin matkan päässä Barcelonasta huippunopeilla junilla. (Wikipedia 2017)

Euroopan toiseksi suurin rataverkosto on pituudeltaan 2037 km ja kuuluu Ranskalle. Ranska aloitti huippunopeiden junien kehittämisen jo 1970 luvulla ja oli monella tapa edelläkävijä teknologiassa. Ranskassa kehitettyä TGV -mallia (train à grande vitesse) onkin siksi käytetty monen muun maan huippunopeiden junien lähtökohtana.

Tekniikkaa on viety muun muassa Espanjaan, Saksaan ja Etelä-Koreaan. Ranskassa huippunopeilla junilla pääsee matkustamaan Atlantin rannalta Välimerelle. Näihin suosittuihin lomakohteisiin ja muun muassa Alppien hiihtokeskuksien läheisyyteen on rakennettu ratoja. (Wikipedia 2017)



Kuva 1. Huippunopeat radat Euroopassa

Italia oli yksi ensimmäisistä maista, joka rakensi huippunopean rataverkon perustan jo 1920-1930 luvulla. Kuitenkin vasta 1980 ja 1990 luvuilla vanhoja ratoja päivitettiin huippunopeaan liikenteeseen sopivaksi. Syynä oli toisen maailmansodan jälkeinen huippunopeiden junien suosion lasku, koska niitä pidettiin liian kalliina. Vuonna 2010 noin 1000 km huippunopeita ratoja oli käytössä. (Wikipedia 2017)

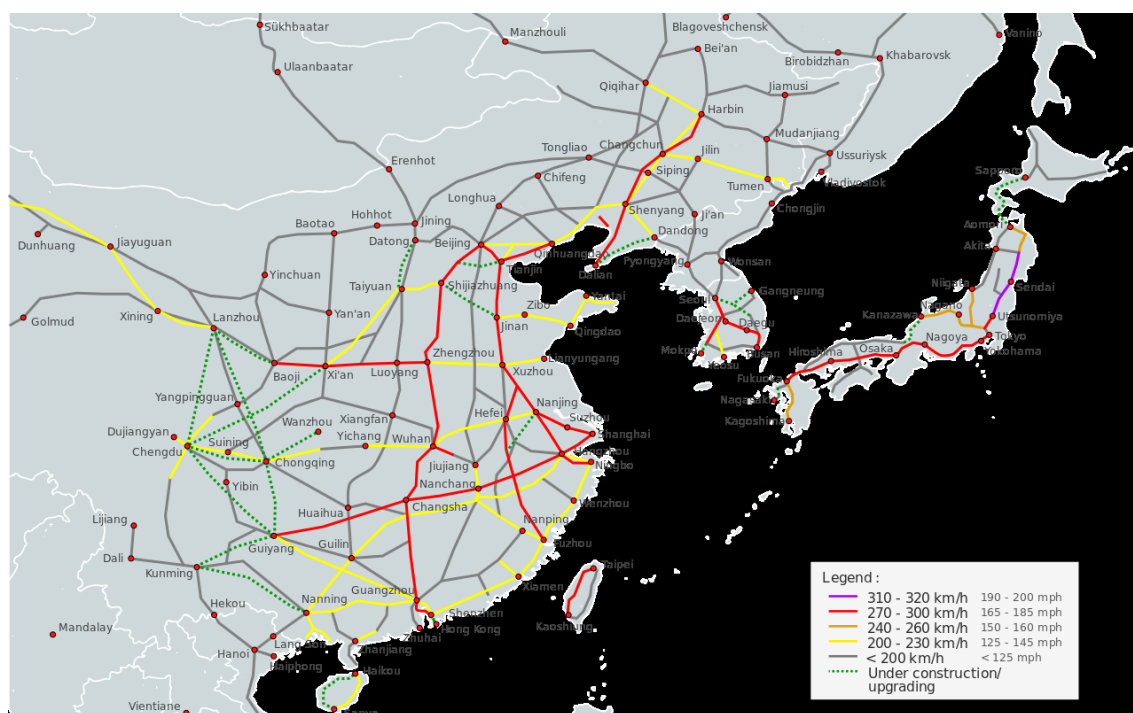
Saksassa alettiin kehittää huippunopeita junia pian Ranskan jälkeen, mutta oikeustaistelut aiheuttivat vuosien viivästyksen ja lopulta saksalainen ICE (Inter City Express) verkosto saatiin käyttöön vasta 10 vuotta Ranskan TGV:n jälkeen. Saksa



kehitti myös Transrapid -teknologiaa, ensimmäistä maglev tekniikkaa. Transrapidia on käytetty pohjana Shanghai maglev -junan kehityksessä. Transrapidin kehittämistä varten oli vuoteen 2012 asti käytössä 31,5 km pitkä testirata, joka on sittemmin purettu. (Wikipedia 2017)

## 3.2 Aasia

Aasiassa huippunopeita junia on Kiinalla, Japanilla, Taiwanilla ja Etelä-Korealla. Kuvassa 2 on esitetty Aasian rataverkosto, josta näkee värjättynä eri nopeuksisia huippunopeita ratoja. Kuvasta näkee, että kattavimmat rataverkostot ovat Kiinassa ja Japanissa. Maailman ainoa liikennekäytössä oleva maglev-rata, Shanghain maglev rata sijaitsee Kiinassa. Muuallakin maailmassa, muun muassa Saksassa on testiratoja, mutta vain Kiinassa tämä tekniikka on otettu huippunopeaan liikennekäyttöön. (Wikipedia 2017)



Kuva 2. Aasian huippunopea rataverkko

Taiwanin huippunopea rata on pituudeltaan noin 350 km saaren länsirantaa pitkin. Rata kulkee pääkaupungista Taipeista eteläiseen Kaohsiungin kaupunkiin ja junien maksiminopeus on 300 km/h. Junat ja koko rata perustuvat pääosin japanilaiseen

Shinkansen teknologiaan, joka on muokattu sopimaan Taiwanin ilmastoon ja maanmuotoihin. (Wikipedia 2017)

Etelä-Koreassa huippunopean radan rakennustyöt alkoivat vuonna 1992 ja rata avattiin vuonna 2003. Tällä hetkellä junien maksimiliikennenopeus on 305 km/h, vaikka infrastruktuuri on suunniteltu jopa 350 km/h nopeudelle. Ensimmäiset junat olivat ranskalaisen TGV Réseau:n pohjalta suunniteltuja KTX sarjan junia. Muutama junasukupolvi myöhemmin Koreassa suunniteltu HEMU-430X juna saavutti 421,4 km/h nopeuden testiajossa vuonna 2013. Koreasta tuli silloin maailman neljäs maa, joka on saavuttanut perinteisellä radalla yli 420 km/h nopeuden. (Wikipedia 2017)

Japanin vuoristoinen maasto toi haasteita perinteisille junaradoille. Alun perin Japanissa oli paljon kapeita ratoja kiemurtelevilla reiteillä, jotka eivät soveltuneet suurille nopeuksille. Tästä seurasi tarve uusien ratojen rakentamiseen, toisin kuin muualla missä oli käytössä leveämpi raideväli, jolla on suurempi päivityspotentiaali. Uudet huippunopeiksi yltävät radat kulkevat täysin erillään vanhoista radoista ja sen sijaan että ne kiertäisivät esteet, ne menevät tunneleiden ja maasiltojen avulla esteiden läpi tai yli. Tasoristeyksiä ei ole, joten täysin junia varten suunniteltua rataverkkoa voidaan käyttää todella täsmällisesti, josta Japanin junayhtiöt ovat tunnettuja. Japanissa on yhteensä noin 2800 km huippunopeita junaratoja. Maksiminopeus näillä raiteilla vaihtelee 240 km/h ja 320 km/h välillä. (Wikipedia 2017)

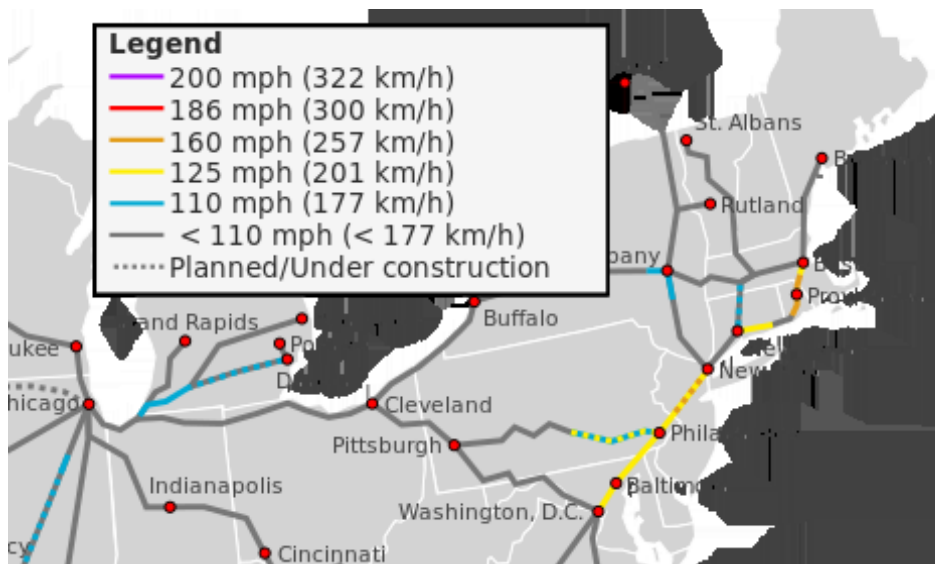
Testikäytössä Japanissa on perinteisellä tekniikalla saavutettu 442 km/h nopeus ja maglev tekniikalla jopa 603 km/h nopeus, joka on junien maailmanennätysnopeus. Perinteisellä tekniikalla maailmaennätysnopeus 574,8 km/h on hallussa Ranskan SNCF:llä. Tämä ennätys on tehty vuonna 2007 ja siinä on käytetty voimakkaasti muunneltua junaa, jonka tarkoituksena oli pelkästään testata nopeutta eikä mahdollista matkustajaliikennettä varten. (Wikipedia 2017)

Kiinalla on maailman laajin huippunopeiden ratojen verkko, tällä hetkellä noin 20 000 km. Tämä on enemmän kuin koko muulla maailmalla yhteensä. Suunnitteluvaiheessa olevat radat, joiden on määrä valmistua vuoteen 2025 mennessä, tulevat nostamaan Kiinan rataverkoston pituuden 38 000 km:iin. Huippunopeiden junien suosio Kiinassa

on kasvanut valtavasti sitten niiden lanseeraamisen Kiinassa vuonna 2007. Vuonna 2016 huippunopeilla junilla matkusti yhteensä 1,44 miljardia matkustajaa. Kiinassa on myös maailman pisin huippunopea linja, 2 298 km pitkä Peking-Kanton rata, sekä maailman ainoa matkustajakäytössä oleva huippunopea maglev-rata: Shanghai maglev. Vuonna 2011 Wenzhou:ssa tapahtunut huippunopean junan onnettomuus johti kaikilla Kiinan huippunopeilla linjoilla maksimiliikennenopeuden laskemiseen turvallisuuden nimissä. Tämä oli suuri kolaus Kiinan huippunopeiden junien osaamiselle, jota oli suunniteltu käytettäväksi valttina tulevaisuudessa esimerkiksi tekemällä osaamisesta vientituote. (Wikipedia 2017)

### 3.3 Amerikka

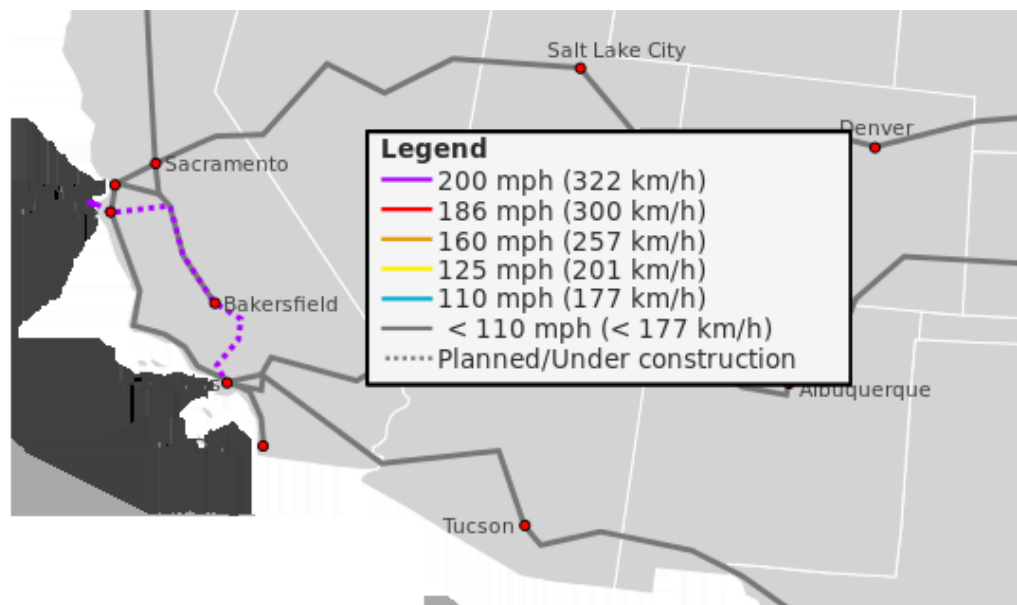
Yhdysvalloissa huippunopeille junille on monta päällekkäistä määritelmää, jotka poikkeavat Euroopan Unionin määritelmistä. Kuitenkin ainoa Yhdysvalloissa käytössä oleva huippunopea juna minkään määritelmän mukaan on Acela Express, joka kulkee Bostonista Washington DC:hen. Acela Expressin sijainti näkyy kuvassa 3. Radan kokonaispituus on 734 km. (Wikipedia 2017)



Kuva 3. Acela Express

Acela Expressillä ei ole sitä varten päivitettyä tai rakennettua rataa, joka laskee matkan keskinopeutta. Se kuitenkin saavuttaa suurimman liikennenopeatensa 149 mph (240 km/h) pienillä pätkillä Rhode Islandin ja Massachusettsin kohdilla. Kokonaisuudessaan matka päästä päähän, mukaan lukien 15 minuutin pysähdysten New Yorkissa, voidaan kulkea keskinopeudella 68 mph (110 km/h). (Wikipedia 2017)

Ainoa Yhdysvalloissa suunnitteilla oleva huippunopea juna, jonka on määrä valmistua ennen vuotta 2025, on Kaliforniassa. Sen on määrä yhdistää Los Angeles ja San Francisco maksimiliikennopeudella 220 mph (350 km/h). Rata näkyy kuvassa 4 vasemmalla. Radan kokonaispituudeksi on suunniteltu yli 1300 km. Projekti on tällä hetkellä ympäristövaikutusarviointi- ja suunnitteluvaiheessa. (Wikipedia 2017)



Kuva 4. Suunnitteilla oleva Kalifornian huippunopea rata

Yhdysvaltojen suuri koko vaikuttaa huippunopeiden junien suosioon. Maassa on useita suuria asutuskeskittymiä kaukana toisistaan, mikä suosii keskuksien väliseen matkustamiseen lentokonetta. Jos suurien keskittymien välinen matka olisi lyhempi, voitaisiin ne matkustaa junalla sopivammassa ajassa. (Wikipedia 2017)

## 4 MAGLEV -TEKNIikka

Perinteisen pyörillä kulkevan junan rinnalle on kehitetty sähkömagneettiseen levitaatioon perustuva Maglev juna. Tämän teknologian historia voidaan jäljittää vuoteen 1934, jolloin saksalainen Hermann Kemper patentoi teknologian. Sittemmin teknologiaa on ollut testikäytössä ympäri maailmaa, muun muassa Japanissa, Koreassa, Sveitsissä ja Yhdysvalloissa. Saksassa oli vuoteen 2011 asti toiminnassa Transrapid -teknologian testirata, mutta toimiluvan loputtua rata on purettu. Saksalaista Transrapid -teknologiaa on hyödynnetty ainoassa huippunopeassa liikennekäytössä olevassa maglev radassa, Shanghain maglev radassa. Rata on noin 30 km pitkä ja yhdistää Pudongin lentokentän ja Longyang road -aseman. Aseman kautta Maglev rata yhdistetään Shanghain metroliikenteeseen. (Lee et al. 2006)

Magneettiseen levitaatioon perustuvia junia voidaan käyttää huippunopeaan liikenteeseen, mutta myös matalien ja keskisuurten nopeuksien liikenteeseen, kuten lähiliikenne esikaupungin ja kaupungin välillä. Shanghai maglev radan lisäksi on käytössä alhaisempien nopeuksien maglev-ratoja Kiinassa, Etelä-Koreassa ja Japanissa. Kuvassa 5 on saksalainen Transrapid testiradalla. Eri maglev tekniikoilla on omat hyvät ja huonot puolensa ja toiset soveltuvat paremmin huippunopeaan ja toiset matalampien nopeuksien liikenteeseen. (Lee et al. 2006)

Hyviä puolia maglev teknologialla perinteiseen verrattuna on pyörien ja raiteiden kulumisesta aiheutuvat huoltokustannuksien poistuminen, tasaisesti jakautunut kuorma ei vaadi niin paljon tukirakenteelta, rakenteensa vuoksi maglev-juna ei voi suistua raiteilta, fyysisen kontaktin puuttuminen poistaa suurimmaksi osaksi äänen ja tärinän, kitkaton toiminta mahdollistaa nopeamman kiihdytyksen ja jarrutuksen sekä on vähemmän altis sään vaihtelulle. Huonompaa verrattuna perinteiseen on massan kasvaessa myös levitaation ylläpitämiseen tarvittava energia kasvaa eli maglev ei sovellu hyvin rahdin kuljettamiseen, rakenteensa takia risteävälle raiteelle siirtyminen on vaikeaa sekä magneettivuo matkustamossa ilman kunnon suojausta nousee lattiatasossa 0.09 Teslaan ja istuintasossa 0.04 Teslaan. Tätä voidaan vähentää suojauksella, mutta se lisää massaa. Lisäksi myös jarruttamien täytyy suorittaa

lineaarisähkömoottoreilla, mutta samalla voidaan ottaa talteen liike-energiaa. (Lee et al. 2006)



Kuva 5. Transrapid testiradalla

Junassa tarvitaan sähköä muun muassa ilmastointiin, valaistukseen, ohjainlaitteisiin ja mahdollisesti levitaatioon tai propulsioon. Sähköenergian siirtäminen junaan voi olla ongelmallista. Alhaisilla ja keskisuurilla nopeuksilla, eli noin 100 km/h asti kannattaa käyttää kontaktiin perustuvaa sähkönsiirtoa, esimerkiksi virroitinta. Suuremmilla nopeuksilla mekaaninen kontakti ei ole enää mahdollista. Sen vuoksi suurilla nopeuksilla sähköä siirretään junaan yleensä lineaarigeneraattorilla. Muuttuvan magneettivuon indusoima virta junan lineaarigeneraattorissa otetaan talteen ja varastoidaan akkuihin. Lineaarigeneraattorin ongelma on vaihteleva jännite epätasaisen ilmaraon takia. Lisäksi kaasuturbiinia voidaan käyttää junassa generaattorin pyörittämiseen. (Lee et al. 2006)

## 4.1 Levitaatio

Levitaatio voidaan saada aikaan nykyään kolmella järkevällä tavalla. Näistä ensimmäinen on Electromagnetic Suspension tai EMS, joka toimii eri magneettinapojen välisellä vetovoimalla. Ilmaraon kontrollointi on tärkeää tässä tekniikassa, koska pieni ilmarako, noin 10 mm, ei ole luonnollisesti tarpeeksi stabiili kuorman muuttuessa. Lisäksi suurilla nopeuksilla raon koon hallitseminen muuttuu vaikeaksi, minkä vuoksi EMS ei sovellu suurille nopeuksille. Kuitenkin EMS voi levitoida hyvin pienillä nopeuksilla ja paikallan seistessä esimerkiksi asemilla, joka ei ole kaikilla tekniikoilla mahdollista. (Lee et al. 2006)

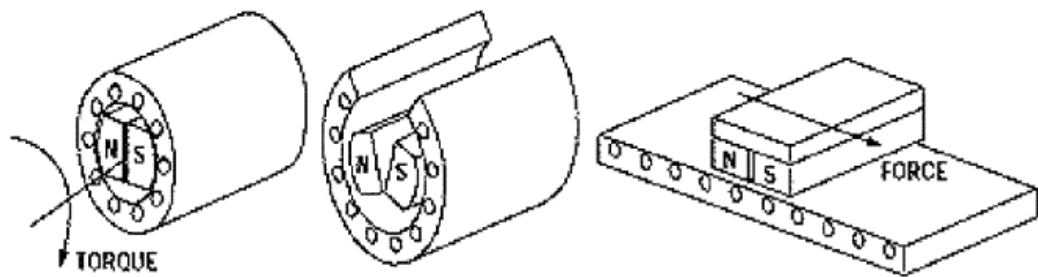
Toinen tekniikka on Electrodynamic Suspension tai EDS. Se eroaa EMS:stä siten, että EDS käyttää hyväkseen magneettista hylkimisvoimaa, ei niiden vetovoimaa. Junan pohjassa olevat magneetit liikkuvat radan induktiokäämien tai muun vastaavan rakenteen yli, jolloin indusoituu virtaa, joka puolestaan luo junaa leijuttavan magneettikentän. EDS on niin vakaa, että sen noin 100 mm ilmarakoa ei tarvitse ulkoisesti säädellä edes kuorman muuttuessa. Sen huono puoli on, ettei se voi levitoida pienillä nopeuksilla tai paikallaan. Siinä käytetään noin 100 km/h nopeuteen asti kumipyöriä kuorman kannattelemiseen. (Lee et al. 2006)

EDS:ssä käytetään joko kestmagneetteja tai suprajohtavia magneetteja. Kestomagneettien etuna on, ettei se tarvitse virtaa tai huomattavaa jäähdytystä. Kestomagneettien teho rajoittaa kuitenkin sovelluksien kokoa. Suprajohtavilla magneeteilla saavutetaan paljon parempi kantavuus, mutta yleensä suprajohtavia ominaisuuksia saavutetaan vasta todella alhaisissa lämpötiloissa, joten jäähdytys voi olla ongelma. Tulevaisuudessa korkean lämpötilan suprajohteet tuovat varmasti uusia mahdollisuuksia EDS tekniikalle. (Lee et al. 2006)

Kolmas tekniikka EMS ja EDS:n lisäksi on Hybrid Electromagnetic Suspension tai HEMS. Tässä tekniikassa on pyritty vähentämään EMS:n energiantarvetta. Siinä käytetään sähkömagneettien lisäksi kestmagneetteja kannattelemaan junaa. Joissain tapauksissa kestmagneetit voivat kannatella junan massan kokonaan ja ilmaraon luomiseen tarvittava ulkoinen energia voi olla jopa nolla. (Lee et al. 2006)

## 4.2 Propulsio

Levitoivan junan täytyy kiihdyttää ja jarruttaa myös kontaktittomasti. Perinteisen pyörillä kulkevan junan liikuttamiseen käytetään perinteistä sähkömoottoria, joka sähkömagneettisen induktion avulla luo vääntömomentin akseliin, joka johdetaan pyöriin. Sen sijaan levitoivassa junassa käytetään lineaarista sähkömoottoria. Kuvassa 6 on esitetty lineaarisähkömoottorin konsepti. Verrattuna perinteiseen, lineaarisähkömoottorin rakenne on yksinkertaisempi ja kestävämpi. Kontaktin ja esimerkiksi hammasvälityksen puuttuminen vähentää huomattavasti tärinää ja ääntä. Lisäksi lineaarimoottorin suuremman ilmaraon takia hyötysuhde on alhaisempi. (Lee et al. 2006)



Kuva 6. Lineaarisähkömoottorin konsepti pyörivästä moottorista

Ensimmäinen lineaarimoottorityyppi on Linear Induction Motor tai LIM. Siinä muuttuva magneettivuo saa aikaan magneettisen voiman, joka työntää kappaletta tai tässä tapauksessa junaa eteenpäin radalla. Jarruttaminen toimii käänteisellä tavalla, jolloin vastakkainen magneettivuon muutos luo vastakkaissuuntaisen eli jarruttavan voiman. LIM tekniikka voidaan toteuttaa kummin päin tahansa: staattorin käämit junan kyydissä ja konduktiolevyt radassa tai konduktiolevyt junassa ja staattorin käämit radassa. Ensimmäisessä radan rakennuskustannukset ovat paljon alhaisemmat, koska tarvittavien käämien määrä on junan kyydissä paljon pienempi. Huono puoli on, että kiihdytys- ja jarrutusvirta pitää siirtää junaan, joka lisää huomattavasti junaan siirrettävän sähkövirran määrää. Jos käämit sijoitetaan rataa, rakennuskustannukset ovat korkeammat suurten käämimäärien takia, mutta sähköä tarvitse siirtää niin paljon junaan. (Lee et al. 2006)



Toinen lineaarimoottoritekniikka on Linear Synchronous Motor tai LSM. Siinä junassa ja radassa on sekä magneetteja että käämejä, joihin muuttuva magneettivuo kohdistaa voiman. Käämien paikat junassa tai radassa voivat olla kummin päin tahansa, kuten LIM:ssä. Voima syntyy napojen veto ja hylkimisvoimasta, kun radan käämien napaisuutta vaihdetaan sopivasti. Napaisuuden vaihtotaajuudella kontrolloidaan junan nopeutta. Junassa olevat magneetit voivat olla joko sähkömagneetteja, kuten saksalaisessa Transrapidissa tai suprajohtavia magneetteja. Huippunopeissa maglev-junissa suositaan LSM tekniikkaa suuremman tehokkuuden takia, koska hyötysuhteella on suuri merkitys ekonomisuuteen huippunopeassa liikenteessä. Kummassakaan tekniikassa ei tarvita anturitekniikkaa ja ne ovat samanlaisia luotettavuudessa ja hallittavuudessa. Valintakriteerinä on yleensä nopeus tai rakennuskustannukset. (Lee et al. 2006)

### 4.3 Ohjaus

Levitoivassa junassa ei voida toteuttaa ohjaavaa voimaa samalla tavalla kuin perinteisessä tekniikassa pyörän muotoilulla. Jälleen kerran on järkevintä ohjata junaa sivuttaissuunnassa käyttäen magneettista veto- tai hylkimisvoimaa. Hylkimisvoimaa voidaan hyödyntää junan molemmilla puolilla olevilla sivuttaissuuntaisilla käämeillä, jotka on yhdistetty yhdeksi virtapiiriksi. Kun juna kulkee radan keskellä, indusoituvat virrat sulkevat toisensa pois, koska molemmilla puolilla oleva ilmarako on yhtä suuri. Kun taas juna kulkee lähempänä toista reunaa, indusoituva virta aiheuttaa ohjaavan sivuttaisvoiman, joka taas palautuu nolleen junan ollessa keskellä rataa. (Lee et al. 2006)

Magneettista vetovoimaa hyödyntäessä periaate on sama kuin edellisessä: junan eri puolilla olevat käämparit on yhdistetty ja niiden välillä virtaava indusoitu virta saa aikaan ohjaavan voiman. Kuitenkin tässä tapauksessa ohjausjärjestelmä on yleensä integroitu levitointijärjestelmään, jolloin niiden välinen interferenssi vaikeuttaa ohjautuvuutta suurilla nopeuksilla. Siitä syystä tämä tekniikka soveltuu parhaiten pienille ja keskisuurille nopeuksille. (Lee et al. 2006)

## 5 KEHITYSKOhteet

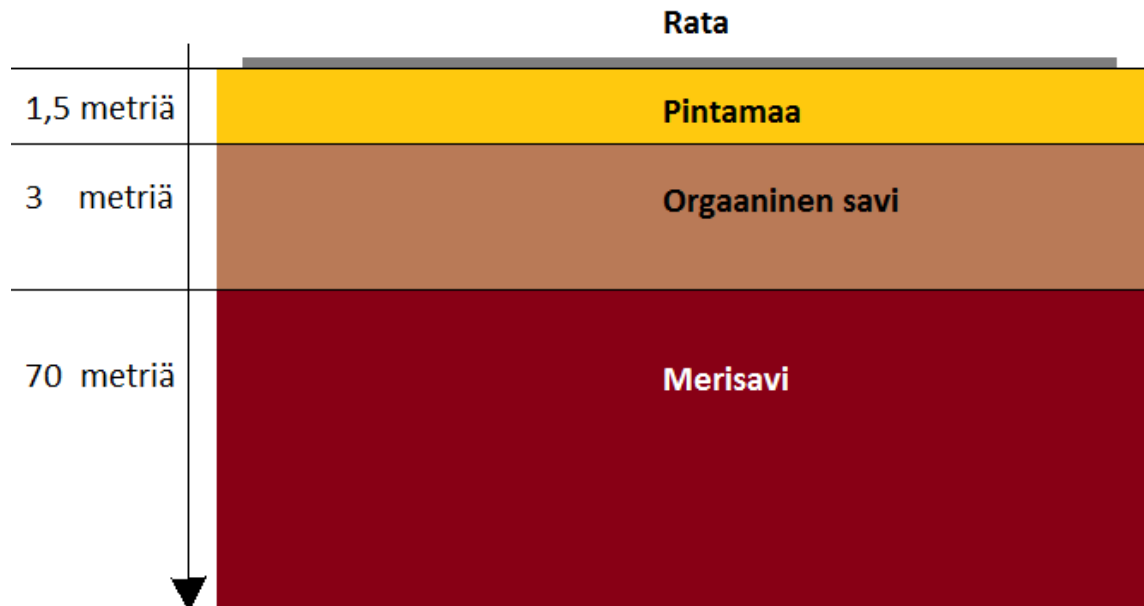
Junien nopeuksien kasvaessa vastaan on tullut uudenlaisia haasteita, kuten junan aerodynaamiset ominaisuudet. Vastaavia ongelmia on jouduttu ratkaisemaan jo aiemmin lentoliikenteen parissa, mutta junissa vasta nopeuden noustessa luokkaan 200 km/h on näistä aerodynaamisista ongelmista tullut merkitseviä tehokkuuden ja turvallisuuden kannalta. Samoin maaperän käyttäytyminen vaihtelee suuresti sen mukaan, kulkeeko raskas juna sen päällä 100 vai 200 km/h luokannopeudella. Lisäksi maaperän ominaisuudet vaikuttavat suuresti tähän, mikä pitää ottaa huomioon uusien ratojen tai vanhojen päivityksen suunnittelussa. (Kaynia et al. 2000)

### 5.1 Rata ja maaperä

Kaynianin, Madshusin ja Zackrissonin tutkimus: Ground vibrations from high-speed trains: prediction and countermeasure käsittelee huippunopeiden junien aiheuttamia siirtymiä ja värähtelyitä maaperässä. Ongelmalliseksi värähtelyt osoittautuvat erityisesti maaperässä, joka koostuu esimerkiksi turpeesta ja savesta, joiden poikkisuuntaisen värähtelyn etenemisnopeus on pieni, 30-40 m/s luokkaa. Tutkimuksessa simuloidaan laskennallisesti, millaisia värähtelyitä maaperään syntyy. Tuloksia verrataan etelä-Ruotsin ajokokeista saatuihin tuloksiin. Ajokokeiden tulosten huomataan korreloivan hyvin simulointien tuloksiin. (Kaynia et al. 2000)

Ajokokeiden tulosten vertailukelpoisuuden ja simulointimallin rakentamisen takia suoritettiin kattava tutkimus maaperän koostumuksesta ja sen geodynaamisista ominaisuuksista. Maaperää tutkittiin paikan päällä, laboratoriossa sekä käyttäen seismisiä metodeja. Koska junan kulku aiheutti epälineaarisuutta ja huomattavia siirtymiä, suoritettiin dynaamisia kokeita maaperän ja sepelin vaimennus- ja moduulikäyrien todentamiseksi. Näitä käyriä käytettiin yhdessä arvioitujen leikkausjännitysten kanssa materiaaliparametrien todentamiseksi numeerisia simulaatioita varten. Tutkimuksen perusteella alue voidaan mallintaa kerroksittaiseksi malliksi eri maalajeja kuvassa 7 esitetyillä kerroksilla ja paksuuksilla. Merisaven

jäykkyys kasvaa syvemmällä tarkasteltaessa. Kallioperä on noin 70 metriä paksun merisavikerroksen alla. (Kaynia et al. 2000)



Kuva 7. Maalajien kerroksien paksuudet laskentamallissa

Kerätyistä tiedoista rakennettiin matemaattinen simulointimalli VibTrain. Malliin syötettävät arvot ovat pyörien aiheuttamien voimien amplitudi ja välimatkat, junan nopeus, raiteiden taivutusjäykkyys, penkereen mekaaniset ominaisuudet ja maakerrosten geodynaamiset ominaisuudet. Simulointimallilla laskettuja tuloksia verrattiin ajokoetuloksiin. Ajokokeet suoritettiin etelä-Ruotsissa käyttäen X-2000 matkustajajunia, joissa oli veturin lisäksi neljä vaunua. Yhteensä kaksikymmentä ajokoetta tehtiin nopeuksilla 10-200 km/h ja maaperän liikkeitä tallennettiin joukolla antureita. Nopeuden kasvaessa huomattiin maaperän siirtymien lähtevän kiihtyvään kasvuun. Yli 140 km/h nopeuksilla siirtymät muuttuivat suuruudeltaan merkitseviksi. Ajokokeiden tulokset asettuvat hyvin lähelle simulointimallin tuloksia, joten niiden voidaan sanoa vahvistavan mallin oikeellisuutta. Myöhemmin mallin tuloksia on todennettu myös muun muassa Ranskan ja Saksan rautatieyhtiöiden toimesta. (Kaynia et al. 2000)

Mallilla lasketuista tuloksista voidaan päätellä, että radan vaste kasvaa nopeuden kasvaessa, mutta kääntyy laskuun maksimiarvon saavutettuaan. Tämän maksimiarvon uskotaan olevan kytköksissä pinta-aallon nopeuden tyyppiarvoon penger-maa-systeemeissä. Voidaan päätellä myös, että alhaisilla nopeuksilla siirtymähuiput ovat lähes samassa kohtaa kuormien kanssa. Nopeuden kasvaessa huiput kasvattavat vähitellen vaihe-eroa kuormiin nähden. Tällä voi olla huomattavia vaikutuksia vierintävastukseen. Ratkaisuksi värinöiden vaimentamiseen ehdotetaan joko penkereen alapuolisen maan vahvistamista tai penkereen jäykistämistä. Parannusehdotukset voidaan toteuttaa esimerkiksi junaradan pohjustamisen betonilaatoilla. (Kaynia et al. 2000)

## 5.2 Aerodynamiikka

Raghunathanin, Kimin ja Setoguchin tutkimus: Aerodynamics of high-speed railway train käsittelee läheisesti ilmanvastuksen ja muiden suurilla nopeuksilla esiintyvien aerodynaamisten ilmiöiden aiheuttamia haittoja huippunopeiden junien näkökulmasta. Tutkimuksessa esitellään nykyisiä ongelmia ja ehdotetaan niihin mahdollisia ratkaisuja.

Huippunopeiden junien kehittyessä on kiinnitetty paljon huomiota sähkömoottorien tehoon, jolla saavutetaan suurempi nopeus. Vähemmän huomiota on kiinnitetty aerodynaamisiin ongelmiin, jotka eivät ole niin merkittäviä perinteisillä nopeuksilla. Tästä on seurauksena suuremmat energiahäviöt ilmanvastuksen, äänen ja värinän muodossa. Ilmanvastus on verrannollinen nopeuden neliöön, josta seuraa valtava tehonhäviö varsinkin nopeuksien kasvaessa yli 300 km/h. Nykyisiä kehityskohteita ovat mm. äänihaitat ja värinät, impulssivoimat junien kohdatessa, impulssiaalto junan poistuessa tunnelista sekä matkustajien korvissa kokema epämukavuus. (Raghunthan et al. 2002)

Samoja kehityskohteita on käsitelty jo kauan sitten lentokoneiden kohdalla, sillä esimerkiksi värinän minimointi on välttämätöntä turvallisuuden vuoksi. Huippunopeiden junien kohdalla nopeudet ovat olleet vielä niin alhaisia, ettei turvallisuus ole ollut uhattuna värinöiden takia. Huippunopeiden junien kohdalla on aiheesta tehty tutkimuksia lähinnä Japanissa, sillä siellä on huippunopeiden junien liikenne keskeistä

ja reittien varrella on useampia tunneleita, missä haittoja voi havaita. (Raghunthan et al. 2002)

Junan virtaviivaisuutta voidaan tutkimuksen mukaan parantaa keulan muotoilulla, sekä rungosta ulkonevien rakenteiden ympäröimisellä tai silottamisella. Perinteisen junan ilmanvastuksesta jopa yli puolet tulee rungon alapuolisten rakenteiden ilmavastuksesta, joten pyörien väliset tyhjät tilat peittämällä saadaan aikaan huomattava muutos ilmanvastuskertoimeen. Tietynlaisella pintojen ja komponenttien silottamisella voidaan kokonaisilmanvastusta vähentää jopa puoleen. Tutkimuksessa todennettiin silotuksen ja keulan muotoilun vaikutuksia pienoismallilla tuulitunnelikokeissa. (Raghunthan et al. 2002)

Tutkimuksessa esitetään ratkaisuksi tunnelista poistumisesta johtuvaan paineaaltoon eräänlaista äänenvaimenninta tunnelin suulle. Eri muotoisilla rakenteilla ja erilaisilla väliseinillä huomattiin olevan vaikutusta vaimennuksen suuruuteen. Äänenvaimennin perustuu paineaallon kimpoiluun rakenteista ja väliseinistä, jolloin se menettää samalla energiaa ennen kuin se pääsee ulkoilmaan. Eri konfiguraatioita on testattu Japanissa, missä monilla rataosuuksilla on useita tunneleita. (Raghunthan et al. 2002)

## 6 TURVALLISUUS

Vaikka turvallisuus nousee jo huippunopeiden junien määritelmässä merkitsevään rooliin nopeuden määrittäjänä, kaikilla liikennemuodoilla, jotka kulkevat jatkuvasti tarpeeksi pitkän aikaa, tapahtuu onnettomuuksia. Huippunopeiden junien kohtaloksi on koitunut neljä suurta onnettomuutta, joissa on kuollut yhteensä 231 henkilöä. Kahdessa niistä pääsyy onnettomuuteen oli inhimillinen virhe, yhdessä laitteiston toimintahäiriö ja yhdessä suunnitteluvirhe. Seuraavaksi on listattu onnettomuudet aikajärjestyksessä, sekä käsitelty syvällisemmin niihin johtaneita syitä ja mahdollisia seurauksia.

### 6.1 Eschede -onnettomuus

Eschedessä, pohjois-Saksassa tapahtui historian suurin huippunopeiden junien onnettomuus. Kesäkuun kolmantena päivänä vuonna 1998 saksalaisen Deutsche Bahn AG:n juna ICE 1 suistui raiteilta. Onnettomuudessa kuoli 101 matkustajaa ja loukkaantui 88. (Esslinger et al. 2004)

Juna oli matkalla Munichistä Hampuriin noin klo 11 aamupäivällä nopeudella 200 km/h, kun yksi sen kolmannen vaunun pyöristä rikkoontui ja jumittui junan pohjaan. Romun raahautuminen mukana aiheutti sen osumisen vaihteeseen, joka käänsi suunnan rinnakkaiselle raiteelle. Junan loppupää ajautui rinnakkaiselle raiteelle ja suistui raiteilta. Junan kaksi ensimmäistä vaunua liikkuivat ylikulkusillan ali, mutta kolmas vaunu oli osittain poikittain ja osui ylikulkusillan tukipilariin aiheuttaen sen romahtamisen. (Esslinger et al. 2004)

Onnettomuuden taustalla oli uudenlaisten pyörien suunnittelun puutteellisuudesta johtuva väsymismurtuma yhdessä junan lukuisista renkaista. Aiemmin saman tyyppisissä junissa käytettiin yhdestä kappaleesta valmistettuja pyöriä, mutta niiden huomattiin suurilla nopeuksilla ja sopivissa olosuhteissa resonoivan luoden tärinää ja ääntä matkustajien epämukavuudeksi. Uudenlainen kumijousitettu pyörä koostui ulkokehästä ja sisemmästä kehästä, joiden välissä oli kantava kumirengas. Kumirenkaan oli määrä vaimentaa syntyvää herätettä ja siten estää melun ja tärinän välittyminen junaan. (Esslinger et al. 2004)

Väsymismurtuma oli syntynyt ulkokehälle ja aiheutti kehän katkeamisen sekä juuttumisen junan pohjaan. Väsymismurtuma oli edennyt noin 80% poikkileikkausalueelle, ennen kuin lopullinen ratkeaminen tapahtui. Kuvasta 8 nähdään, kuinka sileä väsymismurtuma on edennyt laajalle alueelle poikkileikkauksessa, ja vain pieni osa ohjaavan reunan puolella on lopullisesti murtunut rosoisesti. Pyöristä ei löytynyt mitään alkusäröön viittaavaa, joka olisi nopeuttanut väsymismurtuman syntymistä. (Esslinger V. et al. 2004)



Kuva 8. Poikkileikkaus hajonneen pyörän ulkokehästä

Onnettomuuden jälkeen, pyörien valmistajaa sai syytteen murhasta huolimattomuuden takia. Vuonna 2003 oikeudessa kuultiin kolmeatoista asiantuntijaa viidestä eri maasta. Kaikkien tutkimusten ja laskelmien johtopäätökset eivät olleet yhdenmukaisia. Oikeus päätti jättää asian kesken, kun ilmeni, että syytetyn syyllisyys todettiin olevan todella vähäistä. Valmistajan todettiin suunnitelleen pyörät silloisten määräysten mukaisesti, joissa kylläkin oli käytetty pohjana perinteisiä yhdestä kappaleesta valmistettuja pyöriä. Lisäksi määräyksissä ei ollut otettu huomioon nopeuden vaikutusta pyörissä. (Esslinger V. et al. 2004)

## 6.2 Wenzhou -onnettomuus

Seuraava huippunopeita junia koskeva onnettomuus tapahtui itä-Kiinassa Wenzhou:ssa kesäkuun 23. päivänä vuona 2011. Juna oli pysähtynyt maasillalle noin kello 20:30, kun toinen huippunopea juna törmäsi paikallaan olevan junan perään 99 km/h nopeudella. Neljä vaunua suistui raiteilta ja kaksi putosi maasillalta alas. Kuolonuhreja oli yhteensä 40 ja loukkaantuneita 192. Huippunopean junan määritelmän mukainen nopeus ei ollut osallisena onnettomuuteen, mutta onnettomuudella on ollut valtava vaikutus Kiinan junaliikenteen kehittymiseen. Pelastustoimet aloitettiin ripeästi ja päätettiin myös lopettaa ripeästi ja keskittyä romun raivaamiseen junaliikenteen jatkumisen vuoksi. Kiirehtimisen vuoksi yksi vaunuista oli jo haudattu ennen onnettomuustukijoiden saapumista paikalle. Tämä sai paljon kritiikkiä medialta ja verkkoyhteisöiltä, jopa siinä määrin että valtio rajoitti aiheesta uutisointia. (LeFraniere 2011)

Alustavien raporttien mukaan ensimmäinen juna oli pysähtynyt salamaniskun seurauksena ja siksi aiheutti onnettomuuden, mutta onnettomuuden tutkimuksissa on todettu, että juna pysähtyi opastejärjestelmän vian takia. Salama oli iskenyt radan vieressä olevaan opastinlaitteeseen. Järjestelmä ei ollut antanut merkkiä takana tulevalle junalle pysähtyneestä junasta, eikä jälkimmäisen junan henkilökunta ollut huomannut järjestelmän vioittumista. Järjestelmän olisi pitänyt olla vian sattuessa turvallinen. Tutkimuksessa kävi ilmi, että järjestelmässä oli useita suuria suunnitteluvirheitä, järjestelmän tarkastamien oli puutteellista ja salaman aiheuttamaan vikaan ei reagoitu riittävällä tavalla. Tutkinnassa nimettiin 54 virkamiestä vastuulliseksi onnettomuudesta ja pelastustöiden huonosta toteutuksesta. (LeFraniere 2011)

Onnettomuuden jälkeen Kiinan hallinto päätti rajoittaa huippunopeiden junien maksimiliikennenopeutta. Radat, joiden maksiminopeus oli 350 km/h, rajoitettiin 300 km/h, 250 km/h nopeuden radat rajoitettiin 200 km/h ja 200 km/h nopeuden radat rajoitettiin 160 km/h nopeuteen. Lisäksi nopeasti kehittynyt ja suuresti investoitu Kiinan huippunopeiden junien verkosto sai osakseen kritiikkiä, onko niin suuret nopeudet enää turvallisia, vaikka nopeudella ei ollutkaan osuutta onnettomuuteen. Yhdeksi Kiinan vientituotteeksi kaavailtu huippunopeiden junien teknologia kärsi laatu ja turvallisuusepäilyistä. (LeFraniere 2011)



### 6.3 Santiago -onnettomuus

Espanjassa 4 km ennen Santiago de Compostela:n rautatieasemaa, 24. heinäkuuta vuonna 2013 Alvia juna suistui raiteilta mutkassa. Onnettomuudessa kuoli 79 matkustajaa ja loput 141 matkustajaa ja junahenkilökuntaa loukkaantui. Mutkassa on 80 km/h nopeusrajoitus, mutta junan mustasta laatikosta saadun datan mukaan 250 metriä ennen onnettomuuspaikkaa juna kulki nopeudella 195 km/h ja nopeutta oli hätäjarrutuksesta huolimatta onnettomuushetkellä vielä 179 km/h. Todellinen nopeus oli yli kaksi kertaa suurempi kuin suurin sallittu nopeus, mikä olikin raiteilta suistumisen syy. (Penhaul et al. 2013)

Huippunopean junan radalla olisi pitänyt olla viestintäjärjestelmä, joka automaattisesti hidastaa tai pysäyttää junan, jos se on tulossa liian suurella nopeudella mutkaan. Kuitenkin tämä pätkä oli yhteiskäytössä tavallisten junien kanssa ja tällä kohdalla oli käytössä vanhempi viestintäjärjestelmä, joka ainoastaan varoittaa kuljettajalle tämän kulkevan liian kovaa. Tutkimuksissa selvitettiin myös viestitusjärjestelmän kunto, mutta siinä ei havaittu olevan vikaa. (Penhaul et al. 2013)

Osaksi onnettomuuden syynä oli oikeanlaisten viestitusjärjestelmien puutteellisuus ja osittain kuljettajan huomion keskittyminen muualle. Kuljettajaa Garzón Amo:a syytettiin oikeudessa 79:sta murhasta ammatillisen huolimattomuuden perusteella ja 139:stä vahingontuottamisesta samoin perustein. Hänet tuomittiin 79:stä murhasta ammatillisen huolimattomuuden takia ja määrittelemättömästä määrästä vahingontuottamuksia. (Penhaul et al. 2013)

Jälkeenpäin Espanjan rautatieyhtiö Adif asensi välittömästi kolme uudempaa viestitusyksikköä ennen kyseistä mutkaa, mitkä kukin vuorollaan laskevat automaattisesti junan nopeuden 160, 60 ja 30 km/h nopeuksiin, jottei samaan mutkaan voi enää ajaa ylinopeutta. Adif myös aloitti selvityksen vastaavien huippunopeiden ja perinteisten junien yhteiskäytössä olevien ratapätkien varustelusta. Tavoitteenaan oli löytää, tunnistaa ja eliminoida samanlaiset vaaranpaikat. (Penhaul et al. 2013)

## 6.4 Eckwersheim -onnettomuus

Viimeisin huippunopeiden junien onnettomuus tapahtui Ranskassa, Eckwersheimissä, lähellä Ranskan ja Saksan rajaa 14. marraskuuta 2015. Juna oli testiajossa uudella LGV Est radalla, jonka oli määrä ottaa käyttöön viisi kuukautta myöhemmin. Juna suistui raiteilta mutkassa ja juna hajosi kolmeen osaan. Onnettomuudessa kuoli 11 henkilöä ja junassa olleet muut 42 henkilöä loukkaantui. Junan ollessa testikäytössä se ajoi suunnitellusti 10 % suurempaa nopeutta kuin nopeusrajoitus kullakin kohdalla rajoitti. Lisäksi monia suoja-toimintoja oli kytkettynä pois päältä testiajojen takia. (Railway Gazette 2015)

Juna ajoi suoraa radanpätkää nopeudella 352 km/h, rajoituksen ollessa 320 km/h ja junan oli määrä hidastaa ennen mutkaa nopeuteen 176 km/h nopeusrajoituksen ollessa 160 km/h. Juna ei kuitenkaan hidastanut ajoissa ja liiallisen nopeuden seurauksena juna suistui raiteilta. Mustan laatikon tietojen mukaan junan nopeus oli mutkan alkaessa 265 km/h ja onnettomuushetkellä vielä 243 km/h. Tutkimuksessa ei löydetty vikaa radasta, joka olisi ollut osasyllisenä onnettomuuteen. Junan kyydissä oli testiajossa kyydissä 53 henkilöä, joista neljä oli 10-15 vuotiaita lapsia, joita ei virallisesti hyväksytty kyytiin. Onnettomuushetkellä veturin ohjaamossa oli seitsemän henkilöä, joka tutkimuksen mukaan oli pääsyy liian myöhäiseen jarrutukseen ja siten onnettomuuteen. (Railway Gazette 2015)

Ranskan rautatieyhtiö SNCF on suorittanut kurinpitotoimenpiteet työntekijöille, jotka olivat vastuussa muiden muassa lasten läsnäolosta testijunassa, seitsemän ihmisen läsnäolosta ohjaamossa, täsmällisyyden puutteesta matkustajalistoissa, junan kyytiin pääsyn kontrolloinnista ja inhimillisistä virheistä ohjaamossa. SNCF myös keskeytti kaikki huippunopeat testiajot, kunnes onnettomuudesta opitut asiat oli otettu käyttöön testiprosessissa. (Railway Gazette 2015)

## 7 YHTEENVETO

Työssä käytiin läpi yleisesti mitä huippunopeat junat ovat ja miten niitä on käytössä ympäri maailmaa. Suurimmat keskittymät ovat Euroopassa ja Aasiassa. Lisäksi käsiteltiin magneettiseen levitaatioon perustuvan maglev junan periaatteita ja tekniikkaa. Kehityskohteissa otettiin esille ongelmia, joita täytyy ratkaista nopeuksien suurentuessa entisestään. Aerodynaamiset ja värinälliset ongelmat olivat pääosassa, koska niistä on suurin haitta turvallisuudelle ja taloudellisuudelle. Turvallisuutta käsiteltäessä otettiin esiin kaikki huippunopeita junia koskevat kuolemiin johtaneet onnettomuudet. Jokaisen kohdalla paneuduttiin niiden taustoihin, mahdollisiin välillisiin ja välittömiin syihin, sekä seuraamuksiin. Onnettomuuksista puhuttaessa ei luotu uhkakuvaa tai mustamaalattu, vaan esitettiin tutkimuksissa ilmi käyneitä faktoja informatiivisella tasolla.

Huippunopeiden junien kilpailija, lentäminen, on huippunopeisiin junayhteyksiin verrattuna paljon saastuttavampi liikkumismuoto. Huippunopeiden junien käyttämä energia voidaan tuottaa uusiutuvilla energiamuodoilla jopa saasteettomasti. Lentämiseen sen sijaan tarvitaan lähes poikkeuksetta fossiilista polttoainetta, jonka polttaminen aiheuttaa kasvihuonekaasuja. Lisäksi lentokoneiden rakenteet ovat paljon massiivisemmat kuin junien, joten hyötykuorman osuus on pienempi. Toisaalta lentämisellä on mahdollista valita reitti vapaasti. Huippunopeiden junien terminaalit voidaan rakentaa helposti kaupunkien keskuksiin, kun taas lentokentät ovat yleensä monien kilometrien päässä keskuksista. Siksi huippunopeita junayhteyksiä tulisi kehittää, että siitä tulisi lentoliikenteelle hyvä kilpailija myös pitkillä matkoilla.

## 8 LÄHDELUETTELO

Esslinger V., Kieselbach R., Koller R., Weisse B. (2004) The railway accident of Eschede – technical background. *Engineering Failure Analysis* 11: 515-535

Kaynia A. M., Madshus C., Zackrisson P., (2000) Ground Vibration from High-speed Trains: Prediction and Countemeasure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126: 531-537

Lee H.-W., Kim K.-C., Lee J. (2006) Review of Maglev Train Technologies. *Transactions on Magnetics* 42: 1917-1925

LeFraniere S. (2011) The New York Times, Design Flaws Cited in Deadly Train Crash in China. <http://www.nytimes.com/2011/12/29/world/asia/design-flaws-cited-in-china-train-crash.html> [Noudettu 6.2.2017]

Penhaul K., Maestro L. P., Smith-Spark L. (2013) CNN, Spanish train driver charged in deadly crash. <http://edition.cnn.com/2013/07/28/world/europe/spain-train-crash/index.html> [Noudettu 6.2.2017]

Raghunthan R. S., Kim H.-D, Setoguchi T. (2002) Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace Sciences* 38: 469-514

Railway Gazette (2015) Europe, traction & rolling stock, infrastructure, high speed. Late braking caused TGV derailment, says SNCF. <http://www.railwaygazette.com/news/news/europe/single-view/view/late-braking-caused-tgv-derailment-says-sncf.html> [Noudettu 6.2.2017]

Wikipedia (2017) High-speed rail. [https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed\\_rail](https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_rail) [Noudettu 6.2.2017]